

文章编号: 1004-0609(2004)08-1360-06

薄壁门窗型材挤压的有限体积分步模拟^①

李大永¹, 罗超², 周飞³, 彭颖红¹

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200030; 2. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;
3. 同济大学 机械工程学院, 上海 200092)

摘要: 研究了有限体积分步求解方法, 实现了各分步有限体积模拟系统的数据传递和信息继承。针对薄壁门窗型材制品壁薄且纵向尺寸大的特点, 采用了有限体积分步模拟方法对其挤压成形进行了模拟, 并与有限元模拟、有限体积一步模拟进行了对比。结果表明: 1) 有限元模拟往往会因为网格重划分问题造成模拟结果严重失真; 2) 有限体积法一步模拟又对计算机资源有较高要求, 往往会因为内存不足造成计算无法进行下去; 3) 有限体积分步模拟方法模拟精度最高, 可以很好地解决大尺寸薄壁型材制品挤压成形的数值模拟问题。

关键词: 薄壁门窗型材; 挤压; 有限体积法; 分步模拟; 数据传递

中图分类号: TG 316.92

文献标识码: A

Simulation of thin-walled aluminum decoration part extrusion process with multi-stage finite volume method

LI Da-yong¹, LUO Chao², ZHOU Fei³, PENG Ying-hong¹

(1. School of Mechanical Engineering,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;
2. School of Materials Science and Engineering,
Central South University, Changsha 410083, China;
3. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The key technology for multi-stage finite volume method simulation was studied, and data transfer and information inheritance between successive stages were fulfilled. In accordance with the characteristics of an aluminum window part with thin wall and relatively large longitudinal dimension, its extrusion process is simulated with finite volume multi-stage simulation method, whose result is compared with those of finite element method and finite volume one step method. The simulation results reveal that the finite element method results in distorted product shape due to frequent mesh rezoning; computation with one step finite volume method needs too much computer memory; the multi-stage finite volume method can solve the memory-shortage problem in numerical simulation of large-dimensionally thin-walled aluminum profile parts and the highest accuracy is obtained.

Key words: thin-walled aluminum decoration profile; extrusion; finite volume method; multi-stage simulation; data transfer

门窗型材产品在日常生活中有着广泛的应用。对其挤压成形是一个复杂的热力耦合过程, 完全依

靠实验与经验并不能完全掌握其变形规律, 必须借助于金属塑性成形数值模拟技术来研究各种物理场

① 基金项目: 上海市启明星跟踪计划资助项目(No. 01QMH1411)

收稿日期: 2003-12-01; 修订日期: 2004-03-08

作者简介: 李大永(1973-), 男, 副教授, 博士。

通讯作者: 李大永, 副教授; 电话: 021-62835660; E-mail: dyli@mail.sjtu.edu.cn

量的分布规律、预测成形过程中的缺陷和优化成形过程。目前, 基于 Lagrange 方法的有限元方法^[1~9]与基于 Euler 方法的有限体积法^[10~12]在金属挤压成形的模拟中都得到了应用。然而, 对于薄壁门窗铝型材产品挤压成形, 这两种模拟方法都存在着不足之处。

由于薄壁类门窗型材不仅壁薄, 而且往往形状复杂, 用有限元方法模拟铝型材挤压过程中需要不断进行网格重划分。由于受目前网格重划分技术的限制, 成形过程中网格会不断发生畸变导致体积损失过大, 甚至出现网格无法生成的情况, 从而使模拟精度欠佳。

基于有限体积的 Euler 方法是将坐标固定在空间, Euler 网格是一个固定的参考框架, Euler 单元的体积是不变的, 单元由节点连接构成, 节点在空间固定不动。物体的材料在分析过程中可以在网格中流动, 并且材料的质量、动量和能量也随之从一个单元流到另一个单元。因此, 在划分单元时, Euler 网格的范围必须包含材料所有可能流动的区域。有限体积法(FVM)一方面完全避免了有限单元技术和 Lagrange 方法难以处理又无法回避的三维网格重划分问题; 另一方面, 它采用直接积分和显式求解方法, 不需迭代求解平衡方程。

在有限体积法模拟中, 有限体积网格需要事先占据材料所要经过的所有空间。由于薄壁门窗自身特点, 需要将网格划分很细, 因此采用有限体积法模拟会占用大量计算机内存, 如果对成形进行一步模拟, 往往会因为内存不足导致计算无法进行下去。如果采用较粗网格, 虽然占用内存少, 但是模拟精度又不能得到保证。针对这种情况, 本文采用了有限体积分步模拟方法, 将薄壁门窗型材的挤压过程分为多个阶段进行模拟, 每一步的模拟结果作为下一步的初始条件。这样, 在每一步中可以采用比较细致的网格, 而又不会占用很多的计算机资源。

1 塑性成形有限体积法基本理论

有限体积法将材料流动所要经历的空间采用 Euler 网格进行离散。物质从一个单元流到另一个单元, 并且材料的质量、动量和能量也随之从一个单元流到另一个单元。在材料流动的过程中, 必须满足以下控制方程^[13]:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial (\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_i v_j + \rho \delta_{ij} \cdot S_{ij})}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v_i E)}{\partial x_i} = \frac{\partial [v_i (S_{ij} \cdot \rho \delta_{ij})]}{\partial x_j} \quad (3)$$

式中 ρ 、 v_i 、 S_{ij} 、 p 、 E 分别为材料的密度、速度矢量、应力偏张量、压力和内能。

塑性材料的应力—应变关系(即本构关系)可由下式表示:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial t} = G \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right] + \lambda \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \\ \dot{\epsilon}_{ij}^p = \Lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \end{cases} \quad (4)$$

式中 G 、 λ 分别为材料的剪切模量和比例常数, $\dot{\epsilon}_{ij}^p$ 为塑性应变速率张量, Λ 为与应力、应变以及应变速率有关的系数, f 为屈服函数。

状态方程:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = - \int_S \rho \Phi_i n_i dS \quad (5)$$

式中 V 为单元体积, S 为单元的表面积, n_i 为表面法向的单位矢量。

基于 Staggered Grid^[14] 方法对上述控制方程进行有限体积展开, 然后采用龙格-库塔法^[15] 求解各微分方程, 从而得到有限体积内变形体的各种物理场量。

2 FVM 分步模拟方法

2.1 方法流程

整个模拟过程按以下步骤进行:

1) 采用 CAD 软件系统建立型材挤压模具和坯料的几何模型, 输入到第一步有限体积法数值模拟系统中;

2) 根据坯料及模具数学模型建立有限体积网格体系, 并输入材料参数、工艺参数和模拟控制参数;

3) 施加力学和温度边界条件, 采用有限体积法对第一步成形过程进行模拟;

4) 第一步成形结束, 输出有限体积模拟结果到中间数据文件;

5) 建立新的有限体积网格体系, 并实现第一步有限体积模拟系统到第二步有限体积模拟系统的几何数据及各种场量的传递, 将上一步的成形结果

作为下一步的“坯料”;

- 6) 输入模拟所需的控制参数;
- 7) 采用有限体积法模拟第二步成形过程;
- 8) 如达到预期的产品形状, 则整个模拟过程结束, 否则重复(4)至(7)步, 直到达到预期产品形状;
- 9) 输出最终模拟结果。

2.2 各分步之间的几何数据传递

对于三维变形体的几何外形, 在有限元中采用三角形(四面体单元)或四边形(六面体单元)表面网格来表示。数据传递过程中, 首先将上一步数值模拟系统中变形体的表面网格分解成一系列有序的三角形小平面, 然后以 STL 格式输出到数据文件, 再输入到下一步有限体积模拟系统中。

2.3 各分步间物理场量数据传递

为了将上一步数值模拟系统中变形体的物理场量传递到下一步模拟系统中, 必须首先计算有限体积网格体系的中心格点在原有的有限体积网格体系中的局部坐标。设 i 为新的有限体积网格体系的中心格点, 它在上一步网格体系中的局部坐标为 (ξ, η, ζ) , 则 i 点的物理场量可以通过下式插值得到:

$$f_i(\xi, \eta, \zeta) = \sum_{j=1}^p N_j(\xi, \eta, \zeta) f_j^0 \quad (6)$$

式中 $f_i(\xi, \eta, \zeta)$ 为新的有限体积网格中心格点 i 的任意一个物理场量(如速度场、应变速率场、应变场、应力场和温度场等), f_j^0 为 i 点所在的原网格体系中各节点相应的物理场量; p 为单元的节点个数, $N_j(\xi, \eta, \zeta)$ 为插值函数。

对于不在原有限体积网格体系中的新的有限体积中心格点, 其物理场量置零。这样, 便得到了用于下一步有限体积数值模拟的初始物理场量。

3 薄壁门窗型材挤压模拟

在铝型材挤压过程中, 由于挤压比特别大, 很难由坯料直接挤出产品, 实际生产中往往采用导流模或分流模进行预成形。坯料在挤压头作用下, 首先填充预成形模具, 当金属充满预成形模具的型腔以后, 才开始流入成形模具的工作带, 进行终成形。

图 1 所示为派成铝业公司的铝合金门窗型材产品图, 图 2 所示为产品尺寸图, 图 3 所示为导流模及工作带设计图。该产品最小壁厚为 1.4 mm, 属

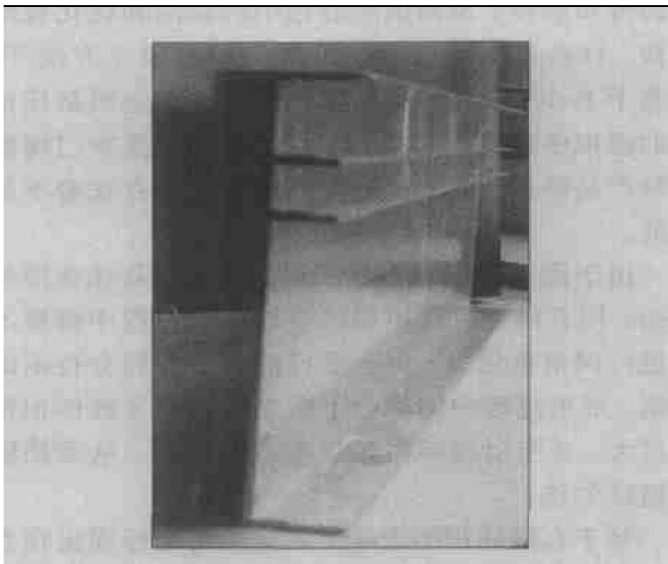


图 1 铝合金门窗型材产品

Fig. 1 Aluminum decoration part

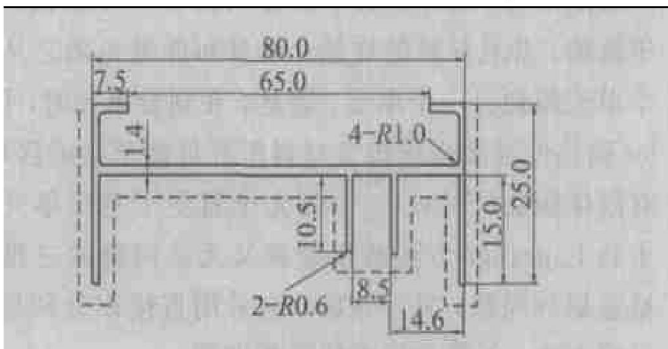


图 2 产品截面尺寸图

Fig. 2 Section configuration(unit: mm)

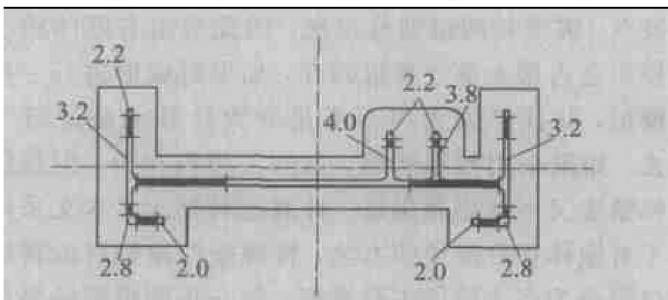


图 3 工作带设计图

Fig. 3 Die bearing design(unit: mm)

于薄壁类产品, 并且纵向尺寸相对较大。型材材料为 6061 铝合金, 棒料直径为 120 mm。棒料预热温度为 480 °C, 模具温度为 460 °C, 摩擦系数为 0.4。

数值模拟在 1.08CPU、1.0GRAM 的 PC 计算机上进行。分别采用有限元法、有限体积法一步模拟、有限体积法分步模拟对该产品挤压成形进行仿真, 压下量为 7.05 mm, 得到相应的变形形状如图 4 所示。在有限元计算中, 由于频繁的网格重划分, 导致最终产品形状模拟结果发生严重畸变(图 4(a))。图 4(b)所示为有限体积法一次模拟结果, 最

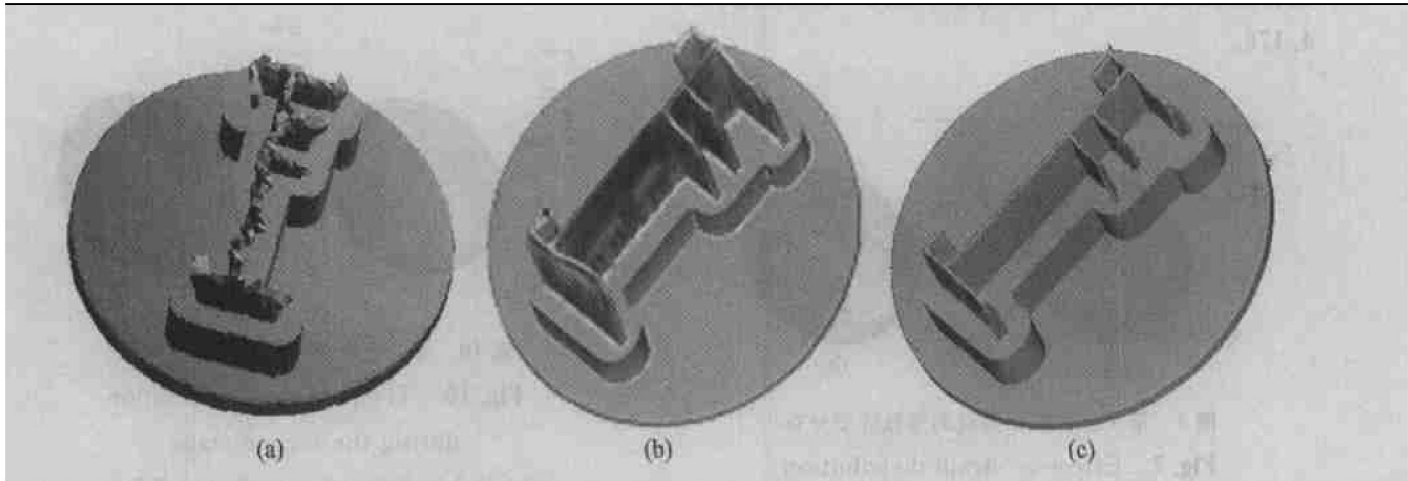


图 4 3 种模拟方法对比

Fig. 4 Results comparison among three simulation methods

(a) —FEM simulation result;

(b) —FVM one-step simulation result (Minimum element size is 1.2 mm);

(c) —FVM multi-stage simulation result (Minimum element size is 0.9 mm)

小单元尺寸为 1.2 mm。可以看到, 有限体积法模拟结果比有限元法光滑, 但如受计算机容量限制, 网格不能划分过细, 最小单元尺寸如果小于 1.2 mm 时会因为计算机内存不足而无法进行下去。图 4(c) 为采用有限体积分步模拟法的模拟结果, 在计算中将成形过程分为两步模拟, 最小单元尺寸可以取到 0.9 mm, 因此其模拟结果的表面质量在 3 种方法中最好。

图 5 所示为第 1 步模拟过程(该步压下量为 3.0 mm)的等效应力分布的演化过程, 图 6 所示为经过与第 1 步模拟结果的数据传递后第 2 步模拟过程(该步压下量为 4.05 mm)的等效应力分布的演化情况。由成形过程图可以看到, 挤出的型材纵向平直, 端面也比较平整, 说明采用 Euler 描述的有限体积分步模拟法可以有效地模拟薄壁型材挤压成形问题。在预成形开始阶段, 坯料和模具接触端面外缘两边各存在着一个难变形区, 这是由于受到挤

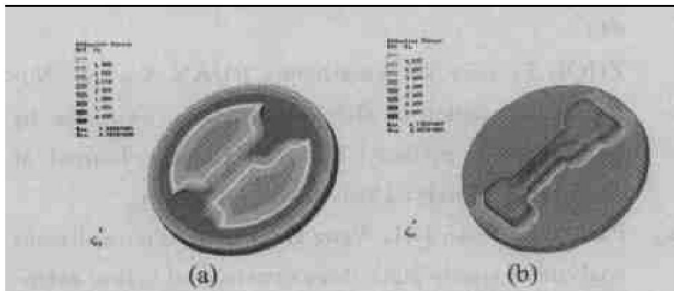


图 5 第 1 分步模拟阶段的等效应力分布

Fig. 5 Effective stress distribution

during the first stage

(a) —Stoke= 0.9 mm; (d) —Stoke= 3.0 mm

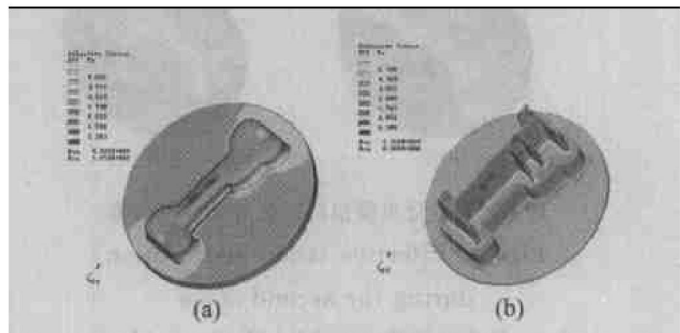


图 6 第 2 分步模拟阶段的等效应力分布

Fig. 6 Effective stress distribution

during the second stage

(a) —Stoke= 3.0; (d) —Stoke= 7.05 mm

压筒、模面和坯料三方挤压造成的, 因而挤压刚开始时该区域应力较大。金属充满预成形模腔时, 就完成材料终成形前的预先分配。在预成形阶段由于成形相对容易, 大量金属流入预成形导流模腔, 变形主要集中于坯料顶端与导流模模口相接触的边沿区域, 因而该区域应力也相对较大。铝材经过预成形后开始进入到终成形平面模工作带部分, 由于平面模模口狭长, 金属的流动变得十分困难, 因而工作带处材料的应力最大, 在实际成形中工作带处模具的磨损也最为严重。

图 7 所示为第 1 步模拟过程的等效应变分布的演化过程, 图 8 所示为经过与第 1 步模拟结果的数据传递后第 2 步模拟过程的等效应变分布的演化情况。可以看出, 刚开始时, 难变形区应变较大, 随后在预成形阶段, 变形主要发生在预成形导流模口边缘。终成形阶段, 变形主要集中在平面模模孔

工作带区域, 变形相当剧烈, 最大等效应变达 4.176。

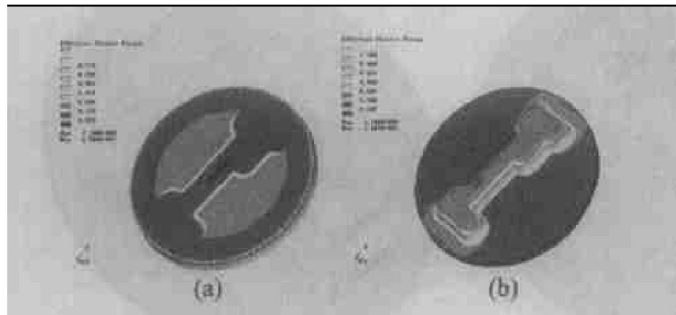


图 7 第 1 分步模拟阶段的等效应变分布

Fig. 7 Effective strain distribution during the first stage

(a) —Stoke= 0.9 mm; (d) —Stoke= 3.0 mm

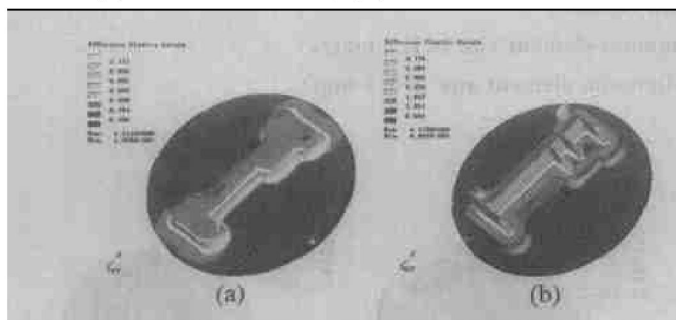


图 8 第 2 分步模拟阶段的等效应变分布

Fig. 8 Effective strain distribution during the second stage

(a) —Stoke= 3.0 mm; (d) —Stoke= 7.05 mm

图 9 所示为第 1 步模拟过程的温度场分布的演化过程, 图 10 所示为经过与第 1 步模拟结果的数据传递后第 2 步模拟过程的温度场分布的演化情况。由于模具预热温度与棒料初始温度接近, 铝材与模具热交换较少, 成形过程中变形体的温度升高主要来自于塑性变形生热和摩擦生热, 因而变形体温度场的分布与其等效应变分布相一致。最高温度始终发生在导流腔和工作带附近, 并向四周递减。

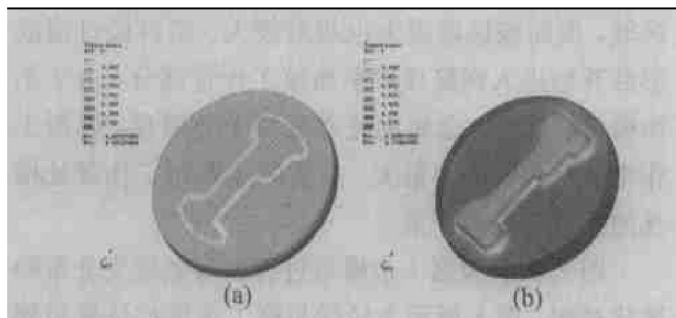


图 9 第 1 分步模拟阶段的温度分布

Fig. 9 Temperature distribution during the first stage

(a) —Stoke= 0.9 mm; (d) —Stoke= 3.0 mm

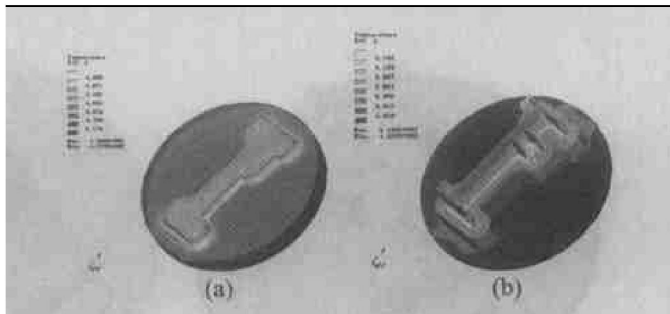


图 10 第 2 分步模拟阶段的温度分布

Fig. 10 Temperature distribution during the second stage

(a) —Stoke= 3.0 mm; (d) —Stoke= 7.05 mm

4 结论

基于薄壁门窗型材纵向尺寸大且壁薄的特点, 本文作者采用有限体积法分步模拟方法, 成功地模拟了该型材零件挤压成形过程。采用有限体积分步模拟的手段来仿真铝型材的挤压成形过程, 一方面可以避免网格再划分难题, 另一方面可以很好地解决一步模拟方法所面临的计算机资源不足的问题, 通过减少每一步计算中 Euler 网格的覆盖区域达到细化网格的目的, 获得理想的模拟结果。

REFERENCES

- [1] 彭颖红, 周 飞, 阮雪榆. 汽车联轴节壳体挤压成形过程三维有限元数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(5): 18-21.
PENG Ying-hong, ZHOU Fei, RUAN Xue-yu. Numerical simulation of joint shell extrusion process using 3D finite element method[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1998, 32(5): 18-21.
- [2] 周 飞, 彭颖红, 阮雪榆. 铝型材挤压过程有限元数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(4): 637-643.
ZHOU Fei, PENG Ying-hong, RUAN Xue-yu. Numerical simulation of aluminum material extrusion by finite element method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998, 8(4): 637-643.
- [3] Park Y B, Yoon J H, Yang D Y, et al. Finite element analysis of steady-state three dimensional helical extrusion of twisted sections using recurrent boundary condition[J]. Int J Mech Sci, 1994, 36(2): 137-148.
- [4] Yang D Y, Lee C M, Yoon J H. Finite element analysis of steady-state three dimensional extrusion of section through curved dies[J]. Int J Mech Sci, 1989, 31(2):

- 145 - 156.
- [5] 彭颖红, 彭大署, 左铁镛. CONFORM 连续挤压变形过程的刚塑性有限元模拟[J]. 中国有色金属学报, 1993, 3(4): 42 - 47.
- PENG Ying-hong, PENG Da-shu, ZUO Tie-yong, Simulation of CONFORM continuous extrusion forming process using rigid plasticity finite element method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1993, 3(4): 42 - 47.
- [6] 闫洪, 包忠诩, 柳和生, 等. 角铝型材挤压过程的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(2): 202 - 205.
- YAN Hong, BAO Zhong-xu, LIU He-sheng, et al. Numerical simulation of angle aluminum profile extrusion processes[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(2): 202 - 205.
- [7] Chanda T, Zhou J, Kowalski L. 3D FEM simulation of aluminum extrusion in the initial non-steady state[A]. Proceedings of the 6th ICTP[C]. 1999(3): 1813 - 1818.
- [8] HAO Nan-hai, LI Ke-zhi. Numerical design of die land for shape extrusion[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 14(1): 91 - 93.
- [9] 彭颖红, 周飞, 阮雪榆. 双向挤压过程内部缺陷的预测研究[J]. 上海交通大学学报, 1996, 30(2): 122 - 125.
- PENG Ying-hong, ZHOU Fei, RUAN Xue-yu. The interior defect prediction during opposite extrusion process[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1996, 30(2): 122 - 125.
- [10] 周飞, 苏丹, 彭颖红. 有限体积法仿真金属塑性成形的基本理论[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(7): 915 - 919.
- ZHOU Fei, SU Dan, PENG Ying-hong. Basic theory for simulation of metal forming with finite volume method[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2002, 36(7): 915 - 919.
- [11] 周飞, 苏丹, 彭颖红, 等. 有限体积法模拟铝型材挤压成形过程[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(11): 65 - 70.
- ZHOU Fei, SU Dan, PENG Ying-hong, et al. Simulation of aluminum material extrusion process with finite volume method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(11): 65 - 70.
- [12] 周飞, 苏丹, 彭颖红. 铝型材挤压有限元和有限体积对比模拟[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(7): 1072 - 1076.
- ZHOU Fei, SU Dan, PENG Ying-hong. Contrast simulation of aluminum extrusion process with FEM and FVM[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2003, 37(7): 1072 - 1076.
- [13] Versteeg H K, Malasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics—the Finite Volume Method[M]. England: Longman Group Ltd., 1995. 5 - 137.
- [14] Slagter W J, Florie C J L, Venis A C J. Advances in 3D forging process modeling[J]. Journal of Computational Physics, 1991, 92: 82 - 105.
- [15] 沈永欢, 梁在中, 许履瑚, 等. 实用数学手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001. 726 - 732.
- SHEN Yong-huan, LIANG Za-zhong, XU Lu-hu, et al. Applied Mathematic Manual[M]. Beijing: Science Press, 2001. 726 - 732.

(编辑 何学锋)